

**JOKIN ESPIERRIZ CRESPO**

**OBTENCIÓN DE CURVAS DE SECADO DE HIERBA LIMÓN**  
*(Cymbopogon citratus)*

Trabajo presentado a la Universidad Federal de Viçosa, como parte de las exigencias del Programa de Graduación en Ingeniero Técnico Agrícola, especialidad en Industrias Agrarias y Alimentarias, para la Universidad Pública de Navarra (UPNA).

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2011

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
INTRODUCCIÓN.....	6
REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
Las plantas medicinales.....	8
<i>Cymbopogon cistratus</i> .....	9
Secado .....	11
Contenido de agua de equilibrio.....	12
Modelos matemáticos.....	13
Energía de activación.....	14
MATERIAL Y MÉTODO.....	16
Material vegetal.....	16
Determinación de la cantidad inicial de agua.....	16
Secado.....	17
Modelos matemáticos para las curvas de secado.....	19
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23

Difusividad efectiva, energía de activación y curvas de secado.....	23
CONCLUSIONES.....	34
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	35
ANEXO.....	39

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructuras químicas de los isómeros geranial e neral.....	10
<b>Figura 2.</b> Vista frontal (a) y corte frontal (b) del secador.....	17
<b>Figura 3.</b> Relación de tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura absoluta para hojas de hierba-limón en diferentes tiempos de presecado (SATTR).....	25
<b>Figura 4.</b> Curvas de secado de las hojas de hierba-limón secas a 50°C y sometidas a pretratamiento a alta temperatura en los tiempos de 5, 10 e 15 minutos (SATTR) ajustada por el modelo de aproximación a la difusión.....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Número de plantas medicinales y aromáticas usadas en diferentes países.....	9
<b>Tabla 2.</b> Metodologías SATTR evaluadas.....	19
<b>Tabla 3.</b> Modelos matemáticos que fueron desarrollados para describir el proceso de secado de las hojas de <i>Cymbopogon cistratus</i> .....	20
<b>Tabla 4.</b> Cantidades de agua de equilibrio para secado co (SATTR) y sin pretratamiento (50°C constante).....	23
<b>Tabla 5.</b> Valores calculados de la difusividad efectiva (Def) obtenidos para hojas de hierba-limón sometidas al pretratamiento de secado (SATTR) y secado con temperatura constante a 50°C.....	23

**Tabla 6.** Valores calculados de la energía de activación ( $E_a$ ) obtenidos para hojas de hierba-limón a diferentes tiempos de presecado (SATTR).....25

**Tabla 7.** Valores estimados de los parámetros para el modelo de aproximación a la difusión obtenidos para los tratamientos de secado de las hojas de hierba-limón sometidas a pretratamiento de secado (SATTR) y sin pretratamiento (50°C constante).....27

## INTRODUCCIÓN

Las plantas medicinales y sus derivados constituyen la base de la medicina herbácea desde hace siglos. Poco a poco, con la evolución de la química, se fueron sustituyendo por compuestos naturales de quimioterapia, que necesitan una gran inversión para ser comercializado como una medicina. En la actualidad, el comercio de plantas medicinales y productos a base de hierbas está creciendo en todo el mundo debido a varios factores, tales como el alto coste de los medicamentos industrializados, la falta de acceso a la quimioterapia para una gran parte de la población, y la tendencia de los consumidores a la utilización de los productos naturales.

Esta cobrando pues, mucha importancia el cultivo y procesado de las plantas medicinales. En Brasil hay diversidad de plantas que se utilizan para remediar enfermedades o problemas de salud o sirven de complemento para la realización de medicinas.

La hierba de limón (*Cymbopogon citratus*), con la que trabajaremos en este proyecto, está muy extendida del norte al sur de Brasil, en forma de té, de aroma y sabor agradable. Es útil en el alivio de las crisis menores de calambres uterinos y el intestino, así como en el tratamiento de estados de nerviosismo e inquietud. También está indicado como antiflatulento, diaforético y antiespasmódico. Su acción sedante antiespasmódica se atribuye a la presencia de actividad citral, y analgésico, el mirceno, ambos componentes del aceite esencial de esta especie.

La utilización de estas plantas esta limitada a la gran variación en sus composiciones. Aspectos relacionados con el cultivo y época de la colecta de la planta, factores climáticos, humedad, luminosidad, parte de la planta que se utiliza, método de transporte, almacenamiento, secado y el proceso de extracción, pueden modificar la composición de los productos, afectando directamente a su seguridad y eficacia (FERREIRA, 1998; CALIXTO, 2000). El secado por tanto es una parte fundamental del proceso que determinará según la temperatura y condiciones en las que se realice las

propiedades de la planta final y si no es realizado correctamente puede comprometer sus principios activos, de ahí la importancia del presente trabajo.

Los objetivos principales que perseguimos con este trabajo son los siguientes:

- Obtener las curvas de secado en función de la temperatura del aire de secado y posterior ajuste de los datos experimentales a los diferentes modelos matemáticos
- Determinar los valores del coeficiente de difusión y la energía de activación

## REVISIÓN DE LITERATURA

### Las plantas medicinales

El mundo de las plantas medicinales vuelve a cobrar protagonismo en los últimos años, realizándose cada vez más investigaciones por parte de la comunidad científica para aplicarlas al mundo moderno.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que la mayor parte de los habitantes del mundo utiliza las plantas medicinales para aliviar algunas de sus necesidades de salud. Además la industria farmacéutica también utiliza en gran medida, y cada vez más, estas plantas para la elaboración del 30% de sus productos. Esto unido a la ideología de la vuelta a la naturaleza y a la desconfianza en los productos de la industria farmacéutica que se consideran repletos de “químicos”, nocivos para la salud ha hecho que incremente de una manera importante el mercado de medicamentos basados en las plantas medicinales.

Las plantas medicinales han sido usadas para diferentes fines en muchas regiones del mundo desde la antigüedad. Después de la creación de la OMS las plantas medicinales han sido comúnmente usadas para prevenir y tratar enfermedades específicas y se considera que desempeñan un papel beneficioso en la salud (SRIVASTAVA et al., 1996)

Aunque muchas plantas han sido usadas tradicionalmente para fines medicinales y aromáticos, todavía muchas de ellas no han sido registradas. En todo el mundo han sido identificadas un total de entre 250,000 a 500,000 especies hasta el momento, sobre 35,000 plantas son usadas para fines medicinales (LEWINGTON, 1993). Tan solo 100 plantas son cultivadas regularmente, mientras que el resto se recogen en su hábitat natural.



País	Número de especies	Referencias
China	5,000- 9,905	Lamber et al., 1997; Kuipers, 1995
India	2,500-8,000	Lambert et al., 1997; Nair and Ganapathi, 1998
Europa	>2,000	Lange 1998
Colombia	2,000	Anonymous, 1997
Nepal	700	Nickel and Sennhauser, 2001
Total en el mundo	35,000- 75,000	Baser, 1997; Nair and Ganapathi, 1998

**Tabla 1.** Número de plantas medicinales y aromáticas usadas en diferentes países

En América Latina en general y particularmente en Brasil, es relativamente común el uso de las plantas en el proceso diagnóstico-terapéutico de una gran cantidad de trastornos. Y es que las plantas medicinales representan una alternativa para el cuidado de la salud y que pueden ser importantes para el desarrollo económico nacional y regional.

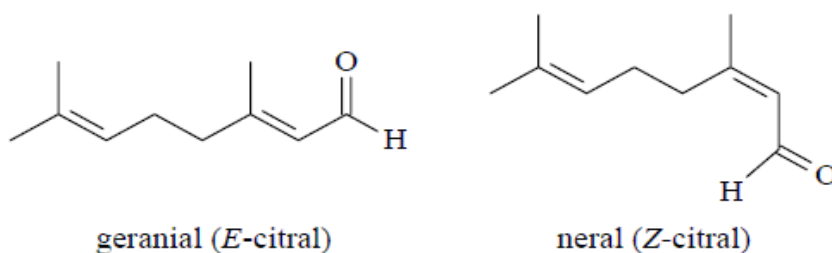
### **Capim-limão (*Cymbopogon citratus*)**

En Brasil se utilizan varias especies diferentes de plantas debido en parte a la influencia de diversas culturas de distinta procedencia dentro del país. Entre ellas podemos encontrar: la camomila (*Chamomilla recutita*), la hortelã (*Mentha* spp.), el manjeriço (*Ocimum* spp.), el capim-limão (*Cymbopogon citratus*) y la vinca (*Catharanthus roseus*).

*Cymbopogon citratus*, hierba limón en España, capim-limão en Brasil, es una planta herbácea, perenne aromática y robusta que se propaga por esquejes y pertenece a la familia de las Gramíneas, que incluye 668 géneros y aproximadamente 9.500 especies distribuidas universalmente y con gran importancia económica. Es originaria de la India pero esta muy distribuida por zonas tropicales, entre ellas Brasil, donde la planta se ha aclimatado perfectamente. (NEGRELLE & GOMES, 2007). Sus

hojas son largas y se reúnen en la base, teniendo de media 100 cm de largura y 1,5 a 2,0 cm de anchura. No soporta zonas muy frías con heladas. Es la planta medicinal con la que trabajaremos en esta tesis. Se utiliza en grandes proporciones en Brasil. Entre sus propiedades podemos citar que es antihipertensivo, antiespasmódico, antifúngico, antiasmático, y antibacteriano, además de muchas otras propiedades que también se le atribuyen aunque aun no han sido probadas.

Esta planta es una especie productora de aceite esencial. El principal componente del aceite esencial es el citral (75-85 %), una mezcla de dos isómeros: neral (cis-citral) y geranial (trans-citral) (LEWINSOHN, et al., 1998; SILVA Jr., 2003). Sus estructuras son las siguientes:



**Figura 01.** Estructuras químicas de los isómeros geranial e neral.

El aceite esencial se encuentra distribuido en las hojas de la planta, de las cuales, es extraído por destilación a vapor. Por su aspecto es una sustancia líquida poco densa, de color brillante, que va del amarillo claro al marrón, y de olor muy característico que es muy utilizado por las industrias de perfumes y cosméticos. Para comercializarlo es necesario que presente como mínimo 75% de citral (ALMEIDA & CANECCHIO FILHO, 1973). Otros componentes del aceite esencial son: 3-metil-2-hoptanona, 6-metil-5-hepten-ona, metil-heptenol,  $\alpha$ -pineno, canfeno,  $\beta$ -pineno, limoneno, mentol, citronelol, citronelal, linalol, óxido de linalol, acetato de geranila, isovaliraldeído, n-decilmaldeído, nerol, geraniol, farnesol e terpineol (SOUSA et al., 1991).

Segun la Farmacopéia Brasileira IV (2003) el aceite que se obtiene de las hojas desecadas contiene como mínimo 0,5% de aceite esencial, constituido como poco por 60% de citral.

Es empleado como aromatizante de ambiente y principalmente como material para sintetizar la Vitamina A (LORENZI & MATOS, 2002). El aceite de *C. Citratus* se encuentra entre los más utilizados y por sus innumerables aplicaciones hacen que sea buscado tanto en el mercado nacional como en el internacional.

## **Secado**

Se conoce como deshidratación la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua de la sustancia que la contiene. Esta definición puede ser aplicada a sólidos, líquidos o gases. En el proceso de secado el calor puede ser transferido por tres medios: convección, conducción y radiación. El primero de ellos es el más utilizado en el secado comercial y consiste en la migración de humedad del interior del producto al exterior, la superficie, donde se evapora (AKYILDIZ et al., 2004)

La deshidratación es una de las técnicas más antiguamente utilizadas en cuanto a la conservación de alimentos se refiere. Aunque antes esta operación se realizaba con la ayuda del sol, hoy en día son numerosos los instrumentos que el hombre dispone. También en el mercado puede encontrarse una amplia variedad de productos deshidratados (vegetales, frutas, carnes, pescados).

Después de la cosecha se inicia un proceso de degradación de las plantas debido al aumento de la actividad enzimática que lleva también a la degradación de los principios activos de las mismas. Para minimizar esos efectos las plantas medicinales deben ser sometidas a un proceso de secado. La conservación por secado se basa en el hecho de que los microorganismos, las enzimas y cualquier otro mecanismo metabólico necesitan de cierta cantidad de agua para sus actividades. Al reducir la cantidad de agua disponible (actividad de agua,  $A_w$ ) se reducirá la velocidad de las reacciones químicas en el producto y por tanto el desarrollo de los microorganismos. La actividad de agua presente en las células y tejidos de las plantas, en torno del 60% a 80%, hace que el

secado tenga una importancia fundamental para evitar la fermentación o degradación de los principios activos de la planta (CHRISTENSEN & KAUFMANN, 1974). Cuando el secado es realizado de manera inadecuada, puede reducir la calidad comercial del producto antes del almacenamiento o acelerar el proceso de deterioro.

El secado debe ser realizado hasta que el producto tenga una humedad entre el 8% y el 12% de acuerdo con la especie y la parte de la planta que se seque. Este proceso no debe ser ni muy rápido ni muy lento, ya que cuando es rápido ocurre la volatilización de los compuestos químicos presentes o degradación de los mismos. Si el proceso es lento puede propiciar el desarrollo de microorganismos. Por eso durante el secado es muy importante tener en cuenta la velocidad con que el agua es retirada de la planta (SILVA & CASALI, 2000)

El tiempo de secado depende del flujo de aire, de la temperatura y de la humedad relativa del aire. Cuanto mayor es la temperatura y mayor el flujo del aire, más rápido es el secado (BROOKER et al., 1992). La temperatura de secado es determinada por la sensibilidad de los principios activos de la planta, por tanto para cada especie hay una temperatura de secado ideal. Por esto algunos investigadores estudian el efecto del secado sobre la calidad y la cantidad del óleo esencial que se extrae de determinadas plantas aromáticas.

Las ventajas de utilizar el proceso de secado son varias, desde la facilidad de conservación del producto hasta la estabilidad de los componentes aromáticos a temperatura ambiente durante un largo tiempo. Otras ventajas son: protección contra la degradación oxidaría y enzimática, reducción de peso, exención de refrigeración durante el transporte y almacenamiento, disponibilidad del producto durante cualquier época del año y agregación de valor al producto (DOYMAZ, 2004a).

### **Contenido de agua de equilibrio**

Las plantas medicinales tienen la propiedad de ceder o absorber agua del ambiente para mantener constantemente una relación de equilibrio entre su contenido en

agua y el ambiente. La planta es mantenida en contacto con el aire sobre condiciones constantes de temperatura y humedad relativa hasta que la condición de equilibrio sea alcanzada y su contenido en agua también tendrá un valor prácticamente constante, el conocido como contenido en agua de equilibrio. (SOKHANSANJ &YANG, 1996)

El contenido de agua de equilibrio obtiene un determinado valor cuando el producto húmedo pierde humedad durante el secado. Por otro lado, adquiere un valor diferente cuando el producto relativamente seco gana humedad por adsorción en un ambiente con humedad relativa elevada. De esta manera para un mismo valor de humedad relativa y temperatura, puede haber dos valores diferentes de cantidad de agua de equilibrio (BERBERT et al., 2000)

Muchos autores estudian el comportamiento higroscópico de varios productos agrícolas utilizando diferentes métodos para expresar la cantidad de agua de equilibrio higroscópico en función de la temperatura y la humedad relativa del aire, lo que son conocidos como isotermas de porción. Para el establecimiento de isotermas que representen esa relación de equilibrio son utilizados modelos matemáticos empíricos, una vez que ningún modelo teórico desarrollado ha sido capaz de estimar con exactitud la cantidad de agua de equilibrio higroscópico para un amplio rango de temperatura y humedad relativa del aire.

## **Modelos matemáticos**

Los modelos matemáticos son herramientas útiles para estimar el tiempo necesario en reducir la humedad de agua del producto a diferentes condiciones de secado mejorando la eficiencia del proceso (ANDRADE et al., 2003). El ajuste de los datos experimentales a los modelos matemáticos es indispensable y que se haga para todas las plantas medicinales y aromáticas para obtener el modelo más adecuado para cada especie.

Se han utilizado diversos modelos matemáticos para describir la cinética de secado de productos agrícolas. Estos modelos son utilizados para estimar el tiempo de secado de los diferentes productos en relación con las curvas de secado. Existen tres tipos de modelos de secado usados para describir la cinética de secado en capa fina de productos agrícolas. El modelo teórico, que solo considera la resistencia interna, la transferencia de calor y el agua entre el producto y el aire caliente, los modelos semi-teóricos y los empíricos, que presentan una relación directa entre la humedad del producto y el tiempo de secado. (MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002).

Entre lo modelos semi-teóricos tenemos los modelos de Page, Page modificado, Henderson & Pabis, Logarítmico, Aproximación a la difusión, Dos termos y Exponencial de dos termos, que se utilizan para la cinética del secado de productos agrícolas (CORRÊA et al., 2007; DOYMAZ, 2007a; MOHAPATRA e RAO, 2005; LAHSASNI et al., 2004; MIDILLI et al., 2002; PANCHARIYA et al., 2002; OZDEMIR e DEVRES, 1999).

Los modelos empíricos no forman una perspectiva de los importantes procesos que suceden durante el secado, aunque en algunos casos pueden describir las curvas de secado para determinadas condiciones experimentales (KEEY, 1972). Entre estos modelos, el que mas ha sido utilizado en estudios de cinética de secado de productos agrícolas es el modelo propuesto por THOMPSON et al. (1968).

Se han propuesto doce modelos para predecir el comportamiento del secado de la hierba limón en este trabajo y determinar la curva de secado de la hierba: Two Terms, Exponential of Two Terms, Lewis, Midilli et al., Page, Page Modificado, Henderson & Pabis, Henderson & Pabis modified, Approach of the difusión, Thompson, Wang e Singh, Logarítmico para determinar la curva de secado de la hierba

### **Energía de activación**

La energía de activación se expresa por medio del modelo de Arrhenius, que relaciona la difusividad con la temperatura.

$$\ln(D_{\text{ef}}) = \ln(D_0) - E_a/R * T$$

Donde:

$D_{\text{ef}}$  = Difusividad efectiva ( $\text{m}^2 \text{s}$ );

$D_0$  = Factor de Arrhenius ( $\text{m}^2 \text{s}$ );

$E_a$  = Energía de activación ( $\text{J mol}^{-1}$ );

$R$  = Constante universal de los gases ( $8,3143 \text{ J. mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );

$T$  = Temperatura (K).

## MATERIAL Y MÉTODOS

### Material vegetal

Las hojas utilizadas de *Cymbopogon cistratus* provienen de plantaciones localizadas en el área experimental de Riego y Drenaje, que pertenece a la Universidad Federal de Viçosa. La planta fue cultivada en un invernadero de 52,5 m<sup>2</sup> en filas con 0,30 m de espacio entre ellas conforme la recomendación de Blank et al. (2007a). El invernadero tiene una forma circular, con 7,5m de anchura, 7m de largura y una altura central de 5m. La cubierta es de polietileno de baja densidad, con 150µm.

La planta fue obtenida entre las 7:00 y las 8:30 horas y la altura de corte fue definida en 20cm a partir de la extremidad basal de la hoja. Después de la colecta y antes de iniciar el proceso de secado, el material fresco fue transportado para el local apropiado, donde las hojas fueron seleccionadas, retirándose las partes damnificadas, así como cualquier parte de otro vegetal o material extraño. Después las hojas fueron sometidas a cortes de 2cm de largura ya que como indica Martinazzo (2006) esa largura proporciona la mayor cantidad de aceite esencial con relación a las hojas secas de 20 y 30 cm de largura. Finalmente fueron colocadas en bolsas de polietileno (40 µm), selladas y almacenadas en cámaras B.O.D a 4±2°C hasta el momento del secado.

### Determinación de la cantidad inicial de agua

La determinación de la cantidad de agua inicial de la planta fue realizada por el método gravimétrico de acuerdo con la metodología descrita por ASAE STANDARDS (2000) para forrajes, utilizándose tres muestras de 25g cada una, que se introdujeron en una estufa con circulación forzada de aire y con temperatura de 103±2°C. Así lo hicieron Martins (2000), Radünz (2004), Barbosa (2005), Martinazzo (2006), Lemos (2008), Radünz et al, (2011).



## Secado

El secado fue realizado en el laboratorio de Pre-procesamiento de Plantas Medicinales, Aromáticas y Condimentarias del departamento de Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa.

Para las pruebas de secado fue utilizado el mismo secador para plantas medicinales usado por Barbosa (2005), Martinazzo (2006), Lemos (2008) e Radünz et al. 2010, con ventilador para mover el aire de secado con flujo ascendente y cinco bandejas de dimensiones 0,25x0,25x0,15m dispuestas horizontalmente. Tiene también instalado un sistema de calentamiento de aire con resistencias eléctricas. La velocidad del aire de secado empleada en todos los ensayos fue de  $1,0 \text{ m s}^{-1}$ .

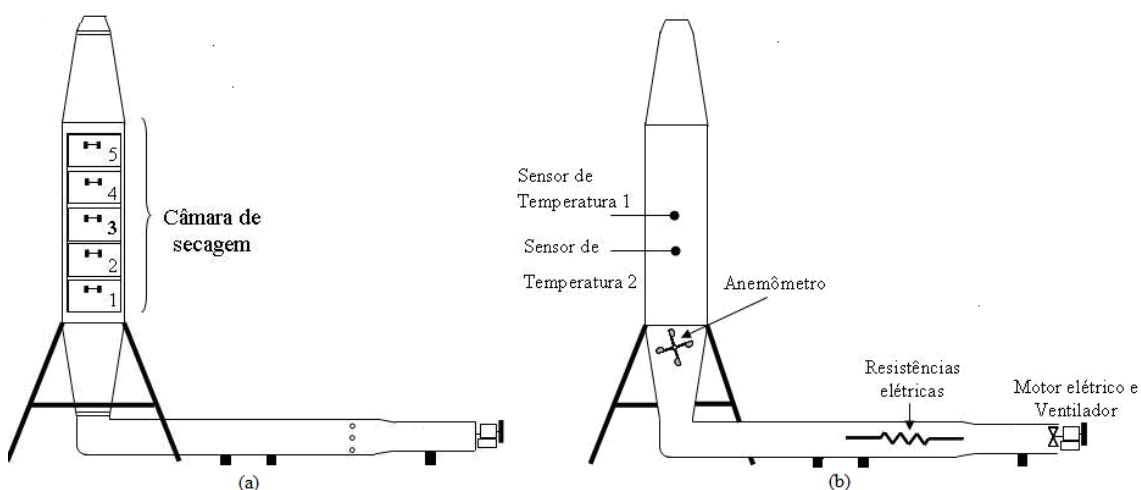


Figura 2. Vista frontal (a) y corte frontal (b) del secador

En ausencia de un método rápido para determinar la cantidad de agua de plantas medicinales, al finalizar el proceso de secado fue calculado matemáticamente, obteniéndose el peso inicial deseado a través de la ecuación que aparece abajo. La cantidad inicial de agua fue, previamente determinada por el método gravimétrico, y finalmente fijada en 10% de humedad.

$$mf = mi \times \left( \frac{100 - X_i}{100 - X_f} \right)$$

Donde:

mf - masa final (g);

mi - masa inicial (g);

$X_i$  - cantidad inicial de agua (% b.s);

$X_f$  - cantidad final de agua (% b.s).

El control de la temperatura del aire de secado fue realizado gracias al microcontrolador PIC, el cual recibía la señal de tensión enviado por el sensor de temperatura. Para el control de la velocidad del aire, fue utilizado un inversor de frecuencia, descrito por Prates (2009)

Para la obtención de los datos de temperatura fueron utilizados dos sensores LM 35 de alta precisión de National Semiconductor. La salida de estos sensores proporciona una señal de tensión con factor de escala de 10 mV para cada grado Celsius, el cual es enviado al ordenador por medio de una placa de adquisición de datos de Datapool Electrónica. En el ordenador estos datos son grabados en planillas electrónicas. Los valores de velocidad eran mostrados en Display LCD, acoplado a la salida del microcontrolador, de cuatro en cuatro segundos y anotados manualmente. La temperatura y la humedad relativa del ambiente fueron medidas con la ayuda de un termo-higrómetro digital y el valor de la humedad relativa de secado fue calculado por el programa GRAPSI (MELO et al., 2004).

Los tratamientos de secado fueron dispuestos en un esquema factorial 5x3+2, constituido de 5 niveles de temperatura inicial del aire de secado (60 ,70 ,80 , 90 y 100), 3 tiempos de permanencia en esa temperatura inicial (5, 10 y 15 minutos) y dos muestras de control (secado a 50°C y planta fresca). Cada uno de los ensayos fue realizado al azar, con tres repeticiones. Los tratamientos están representados en la siguiente tabla.

SATTR	Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)	At (min)
1	60	50	5, 10 y 15
2	70	50	5, 10 y 15
3	80	50	5, 10 y 15
4	90	50	5, 10 y 15
5	100	50	5, 10 y 15
Muestras control	50	50	-
Muestra control (fresca)	-	-	-

**Tabela 2.** Metodologías SATTR evaluadas.

La propuesta inicial del trabajo era que el secador tuviese control automático de la temperatura del aire de secado, preparado para recibir los programas SATTR, o sea, que las muestras después de ser colocadas en la cámara de secado, fuesen sometidas a altas temperaturas en períodos de tiempos cortos en el inicio del secado, y posteriormente, a temperatura constante de 50°C, hasta que el producto llegara al 10% de humedad. Por tanto, no fue utilizado el sistema SATTR directamente acoplado al secador debido a problemas de funcionamiento del mismo. Para controlar ese problema, los tratamientos iniciales de secado (SATTR) eran realizados en la estufa con circulación de aire forzada e inmediatamente transferidos para el secador a temperatura de 50°C para finalizar el proceso de secado.

Después del secado las muestras fueron embaladas en bolsas de polietileno (40µm) y almacenadas en cámara climatizada a 4°C, tipo B.O.D., hasta el momento de los análisis químicos. Fueron analizados la cantidad de aceite esencial y los principales componentes químicos de ese aceite. (mirceno, neral, geranial e citral).

### Modelos matemáticos para las curvas de secado

La cantidad de agua de equilibrio para la hierba-limón fue determinada por la siguiente ecuación propuesta por Correa et al. (2002).

$$X_e = \frac{1}{(a \cdot T^b + UR^c)}$$

Donde:

$X_e$  - Cantidad de agua de equilibrio (b.s.);

$T$  - Temperatura del aire (°C);

$UR$  - Humedad relativa del aire de secado (decimal);

$a, b, c$  - constantes que dependen de la naturaleza del producto. Para la hierba-limón:

$a = -1,0484$ ;  $b = -0,0221$  e  $c = -0,0628$ .

La cantidad de agua ( $RX$ ) a diferentes condiciones de aire de secado fue calculada empleando la ecuación siguiente:

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e}$$

Donde:

$RX$  - Razón de cantidad de agua (adimensional);

$X_t$  - cantidad de agua del producto en el tiempo  $x$  (b.s.);

$X_0$  = cantidad de agua inicial del producto (b.s.).

Los valores experimentales de  $RX$ , para cada temperatura de aire de secado fueron ajustados 12 modelos matemáticos citados en la literatura conforme en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Modelos matemáticos que fueron desarrollados para describir el proceso de secado de las hojas de *Cymbopogon cistratus*

Modelo	Ecuación	Referencia
Aproximação da difusão	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Sharaf-Elden et al. (1980)
Dois termos	$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Henderson (1974)
Exponencial de dois termos	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Kassem (1998) apud Togrul & Pehlivan (2003)
Henderson & Pabis	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis (1961)
Henderson & Pabis		

modificada	$RX = a.\exp(-k.t)+b.\exp(-k_0.t)+c.\exp(-k_1.t)$	Karathanos (1999)
Lewis	$RX = \exp(-k.t)$	Lewis (1921)
Logarítmico	$RX = a.\exp(-k.t)+c$	Akpinar & Bicer (2005)
Midilli et al.	$RX = a.\exp(-k.t^n)+b.t$	Midilli et al. 2002
Tompson	$RX = \exp(-a-(a^2+4.b.t)^{1/2})/2.b)$	Tompson et al. (1968)
Page	$RX = \exp(-k.t^n)$	Page (1949) apud Bruce (1985)
Page modificada	$RX = \exp(-k.t)^n$	Overhults et al. (1973)
Wang & Singh	$RX = 1+a.t+b.t^2$	Wang & Singh (1978)

La difusividad efectiva fue calculad por la ecuación siguiente basada en la Ley de Fick, utilizándose ocho variables para la ecuación.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp\left[-(2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2}\right]$$

Donde:

L - espesura del producto (m).

La energía de activación, que expresa la dependencia de la difusividad en función de la temperatura, fue calculada por la ecuación de Arrhenius:

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{R \cdot T}$$

Donde:

$D_{ef}$  - Difusividad efectiva ( $m^2 s$ );

$D_0$  - Factor de Arrhenius ( $m^2 s$ );

$E_a$  - Energía de activación ( $J mol^{-1}$ );

R - Constante universal de los gases ( $8,3143 J. mol^{-1} K^{-1}$ );

T - Temperatura (K).

Para el ajuste de los modelos matemáticos a los datos experimentales fue realizado el análisis de regresión no lineal, por el método Simplex-Quasi-Newton, empleándose el programa de ordenador STADISTICA 8.0<sup>®</sup>. Los valores de los

parámetros de los modelos fueron estimados en función de la temperatura del aire de secado.

La elección del método de secado fue realizada en función del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ ), del error medio relativo (EMR) y del error medio estimado (EME). El error medio relativo y el error medio estimado, para cada modelo, fueron determinados por las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$EMR = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - Y_0|}{Y}$$

$$EME = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_0)^2}{GLM}}$$

Donde:

n - número de observaciones;

Y - valor observado;

Y0 - valor estimado por el modelo; y

GLM – Número de observaciones menos uno.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Difusividad efectiva, energía de activación y curvas de secado

Los valores de cantidad de agua de equilibrio para la hierba-limón, calculados a través del modelo propuesto por Correa (2002) están presentes en la tabla.

**Tabla 4.** Cantidades de agua de equilibrio para secado co (SATTR) y sin pretratamiento (50°C constante).

Temperatura (°C)	cantidad de agua de equilibrio (b.u.)		
	Tempo (min)		
	5	10	15
60	6,774	6,720	6,732
70	6,792	6,829	6,820
80	6,719	6,720	6,767
90	6,834	6,755	6,785
100	6,785	6,877	6,875
secado sin pretratamiento			
50	7,009		

Los valores calculados de la difusividad efectiva (Def) obtenidos para los diferentes tratamientos de secado de hojas de hierba-limón están reflejados en esta tabla. Para los pretratamientos de secado (SATTR) la difusividad efectiva es directamente proporcional tanto para el aumento de la temperatura inicial (60, 70, 80, 90, 100°C) como para el aumento del tiempo de permanencia en esa temperatura (5, 10 y 15 minutos), mostrando la disminución de las resistencias internas de secado como el aumento de la temperatura y tiempo.

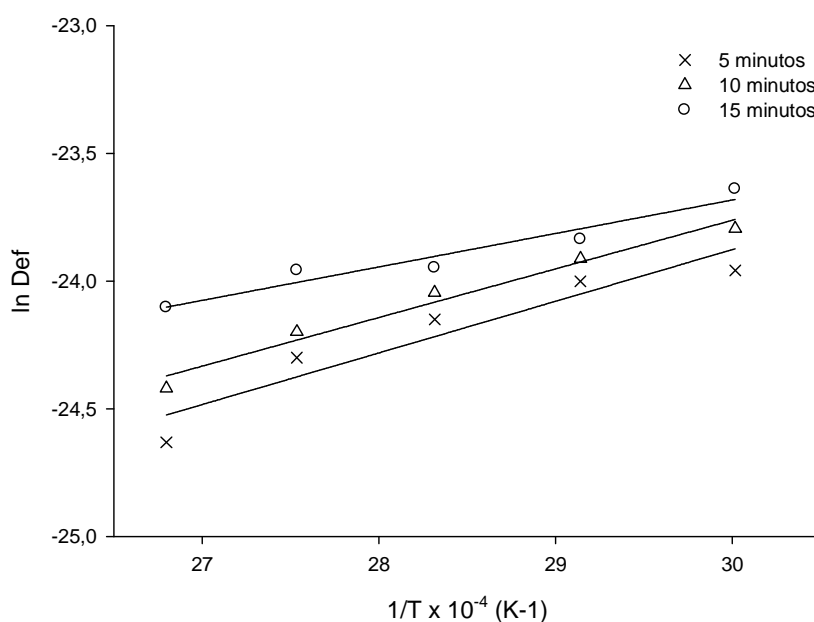
**Tabla 5.** Valores calculados de la difusividad efectiva (Def) obtenidos para hojas de hierba-limón sometidas al pretratamiento de secado (SATTR) y secado con temperatura constante a 50°C.

Difusividad efectiva ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )			
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Tempo (min)		
	5	10	15
60	$2,01 \times 10^{-11}$	$2,48 \times 10^{-11}$	$3,41 \times 10^{-11}$
70	$2,80 \times 10^{-11}$	$3,09 \times 10^{-11}$	$3,93 \times 10^{-11}$
80	$3,25 \times 10^{-11}$	$3,61 \times 10^{-11}$	$3,98 \times 10^{-11}$
90	$3,77 \times 10^{-11}$	$4,12 \times 10^{-11}$	$4,44 \times 10^{-11}$
100	$3,93 \times 10^{-11}$	$4,64 \times 10^{-11}$	$4,91 \times 10^{-11}$
secado sin pretratamiento			
50	$3,24 \times 10^{-11}$		

Observándose la tabla de encima, se verifica que los valores de la difusividad efectiva van desde  $2,01$  a  $4,91 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ . Estos valores están dentro de los valores que Martinazzo (2006) encontró (desde  $1,00$  a  $6,03 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ ) al secar diferentes tamaños de hojas de hierba-limón (2, 5, 20, 30 cm) a diferentes temperaturas (40, 50 y  $60^{\circ}\text{C}$ ). Para la hoja de 2 cm y temperatura del aire de secado a  $50^{\circ}\text{C}$ , esta autora encontró un valor de la difusividad efectiva de  $3,20 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$  estando este valor muy próximo al encontrado en este trabajo ( $3,24 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$ ) para esta misma longitud y temperatura de secado. Barbosa et al. (2007) observaron que los valores de la difusividad efectiva calculados para las hojas de Erva-cidreira (*Lippia alba*) variaban entre  $2,91 \times 10^{-12}$  y  $11,71 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$  para temperatura de entre 40 a  $80^{\circ}\text{C}$ . Valores superiores fueron encontrados por Akpinar (2006), donde fue observado una amplitud de valores de  $4,53 \times 10^{-12}$  y  $7,04 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \text{s}^{-1}$  para las especies de menta (*Mentha* sp.), salsinha (*Petroselinum crispum*) y manjericao (*Ocimum basilicum*). La difusividad efectiva depende de las características del aire de secado y de las demás propiedades físico-químicas de la especie estudiada (Rizvi, 1986) siendo la esta explicación para la diversidad de resultados encontrados en los trabajos relacionados con el tema.

En la presente figura, están relacionados los valores de la difusividad efectiva (Def) para cada tratamiento de secado SATTR en función de la temperatura absoluta del aire de secado. Se puede observar que la difusividad efectiva presentó un comportamiento lineal en función de la alta temperatura inicial del aire de secado en los tratamientos de SATTR, mostrando la dependencia de Arrhenius.





**Figura 3.** Relación de tipo Arrhenius entre la difusividad efectiva y la temperatura absoluta para hojas de hierba-limón en diferentes tiempos de presecado (SATTR).

A continuación son presentados los resultados de la energía de activación calculada con la inclinación de las rectas obtenidas. Se observa que los valores de la energía de activación aumentan con el aumento del tiempo de permanencia en alta temperatura, comportamiento esperado, ya que la energía de activación depende de la cantidad de transferencia de calor. Cuanto mayor es el tiempo de permanencia para una determinada temperatura, mayor será la transferencia de calor y consecuentemente mayor será la energía de activación necesaria para la difusión del agua.

**Tabla 6.** Valores calculados de la energía de activación ( $E_a$ ) obtenidos para hojas de hierba-limón a diferentes tiempos de presecado (SATTR).

Tempo (min)	Energía de Activación ( $\text{kJ mol}^{-1}$ )
5	10,87
10	15,80
15	16,78

En las tablas anteriores son presentados los valores de los coeficientes de determinación ajustados ( $R^2$ ), de los errores medios relativos (EMR) y de los errores medios estimados (EME), para cada uno de los modelos matemáticos ajustados a los datos experimentales de secado de las hojas de hierba-limón.

Observando las tablas se verifica que a pesar del coeficiente de determinación los resultados son superiores al 90%, independientemente del modelo y del tiempo de permanencia a alta temperatura en los pretratamientos de secado. Tan sólo los modelos de Midilli et al. y aproximación a la difusión obtuvieron valores de coeficientes de determinación por encima del 99% y errores medios relativos inferiores a 10% para todos los tratamientos de secado con SATTR. Estos dos modelos también presentaron los menores valores para el error medio estimado. Los coeficientes de determinación por encima de 98% representan un buen ajuste del modelo matemático para describir el fenómeno de secado (MADAMBA et al., 1996). De acuerdo con Aguerre et al. (1989), los resultados de errores medios relativos inferiores al 10% indican un buen ajuste de los valores observados en relación a los ajustados por el modelo en cuestión. El valor del error medio estimado es inversamente proporcional a la capacidad del modelo en describir con fidelidad el proceso de secado (PANCHARIYA et al., 2002)

Por tanto, el modelo de aproximación a la difusión presentó el mejor ajuste para describir el proceso de secado de las hojas de hierba-limón con pretratamiento (SATTR) en todas las temperaturas (5, 10 y 15 minutos), ya que los resultados obtenidos para los coeficientes de determinación fueran los mayores y los errores medios relativos y el error medio estimado fueron los menores entre los 12 modelos propuestos. El modelo de aproximación a la difusión presentó coeficientes de determinación superiores al 99,92%, error medio relativo y error medio estimado inferiores a 4,88% y 0,0192, respectivamente.

De acuerdo con los resultados presentados en la tabla 4 para el secado a 50°C constante, se verifica que todos los modelos desarrollados, con excepción de los modelos de Thompson y Wang & Singh, representan el secado de las hojas de hierba-limón con un grado de precisión satisfactorio, presentando coeficientes de determinación por encima de 99,37%, errores medios relativos por debajo de 9,58% y

errores medios estimados menores de 0,032. Por tanto, el modelo de aproximación a la difusión también fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales, pues presentó el mayor valor de coeficiente de determinación (99,95%), menor error medio relativo (3,43%) y menor error medio estimado (0,0097). El modelo de Midilli et al., presentó un buen ajuste para el secado a 50°C con el segundo menor valor de error medio relativo (4,59%).

En la tabla que se muestra a continuación se presentan dos parámetros para el modelo de aproximación a la difusión, que presentó un ajuste adecuado a los datos experimentales para todos los tratamientos SATTR y para el secado a temperatura constante de 50°C.

Esta ecuación representa la estimación para el parámetro “k” del modelo de aproximación a la difusión en función de dos tiempos de permanencia en alta temperatura (5, 10, y 15 minutos) y de las temperaturas iniciales altas (60, 70, 80, 90 y 100°C). Los parámetros “a” y “b” del modelo no fueron significativos.

$$K = -0,1565 + 0,04335 \cdot \text{tiempo} - 0,001419 \cdot \text{temperatura}$$

$$R^2 = 0,74$$

**Tabla 7.** Valores estimados de los parámetros para el modelo de aproximación a la difusión obtenidos para los tratamientos de secado de las hojas de hierba-limón sometidas a pretratamiento de secado (SATTR) y sin pretratamiento (50°C constante).

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Coeficientes		
		k	a	b
5	60	0,045839	0,139493	0,103458
	70	0,100822	0,184409	0,090237
	80	0,124322	0,176998	0,092151
	90	0,171560	0,120405	0,143358
	100	0,239349	0,231886	0,069245
	60	0,225042	0,189921	0,074150
	70	0,234160	0,076441	0,122652

10	80	0,240204	0,140564	0,098055
	90	0,249843	0,166606	0,078033
	100	0,254161	0,152380	0,117814
15	60	0,233961	0,075431	0,112652
	70	0,248677	0,320043	0,040343
	80	0,275803	0,242931	0,059126
	90	0,292178	0,070815	0,074794
	100	0,299191	0,169862	0,093749
secado sin pretratamiento (50°C constante)				
	50	0,127482	0,174461	0,083738

Como se puede observar en la tabla para cada tiempo en alta temperatura, el parámetro “k” aumenta en función de la elevación de la alta temperatura inicial del aire de secado. También es posible verificar que, para una misma temperatura inicial, se da un aumento del valor de “k” con un aumento del tiempo. El parámetro “k” esta relacionado con la difusión líquida que controla el proceso de secado (MADAMBA et al, 1996) y varia de acuerdo con la temperatura de secado y la cantidad de agua inicial del producto (BROOKER et al., 1992)

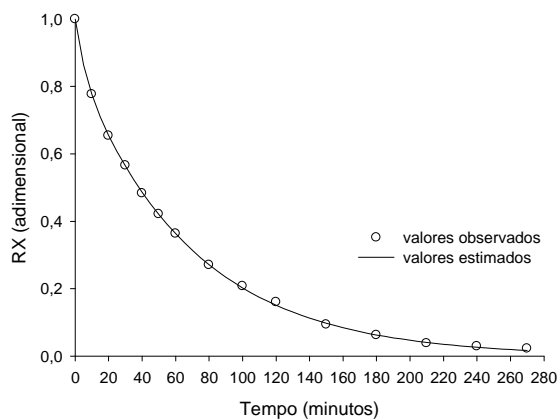
El secado de las hojas de hierba-limón (*Cymbopogon cistratus*) evaluada por Ibrahim et al., (2009), empleando cuatro modelos matemáticos (Nexton, Page, Page Modificado e Henderson & Pabis) a los datos experimentales. Los autores definieron ser el modelo de Newton el más adecuado para describir las curvas de secado a las temperaturas de 35, 45 y 55 °C. Esta misma especie fue secada por Martinazzo et al.(2010) a diferentes temperaturas (30,49,59 y 60°C) para obtener las curvas de secado de la planta. Las curvas fueron ajustadas a partir de los datos experimentales utilizándose diez modelos diferentes (Page, Lewis, Exponencial de dos termos, Dois termos,Henderson & Pabis, Page modificado, Wang & Sing, Thompson, Aproximación a la difusión, Henderson y Pabis modificado. El modelo de Page modificado fue el que mejor se ajustó a los datos observados para la descripción de la cinética de secado de las hojas de hierba-limón. En un estudio previo Martinazzo et al. (2007) estudiaron el secado también de hierba-limón a las mismas temperaturas. Los datos experimentales fueron ajustados a varios modelos (Newton, Page, Page modificado, Thompson, Henderson & Pabis, Logarítmico, Dos termos, Exponencial de dos termos, Wang & Sing, Henderson y Pabis modificado, Midilli et al. y Aproximación a la difusión. Los

autores concluyeron que el modelo propuesto por Midilli et al. fue el que mejor se adaptó a los datos experimentales.

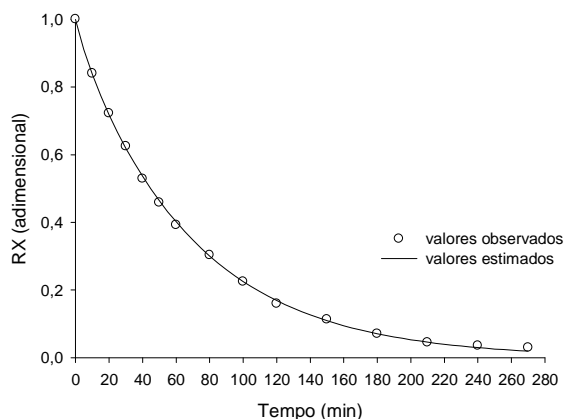
El efecto de secado SATTR sobre rodajas de banana (*musa spp*) fue evaluado en dos experimentos realizado por Hofsetz y Lopes (2005) y Hofsetz et al. (2007) respectivamente. En un primer experimento los frutos fueron secados en tres etapas: inicialmente por cinco minutos a 70°C, en la segunda fijando la etapa SATTR (130, 140, 150°C por 9, 12, 15 minutos) y por último secado a 70°C hasta llegar al 3% de cantidad de agua final. se concluyó que los modelos matemáticos de Page y exponencial describían satisfactoriamente el proceso de secado. En el segundo experimento fueron aplicados en la etapa inicial del proceso de secado tres SATTR: temperatura del aire de secado a 130°C durante 23 minutos, 140°C por 15 minutos y 150°C durante 12 minutos, siendo la temperatura posteriormente ajustada a 70°C hasta finalizar el proceso de secado. También fue evaluado el secado convencional utilizando temperatura constante del aire de secado a 70°C. Los autores concluyeron que el modelo de Lewis ajustó los datos experimentales adecuadamente.

Pardeshi y Chattopadhyay (2010) evaluaron 15 modelos matemáticos para ajustar los datos de secado SATTR de un cereal a base de soja y trigo. El proceso de secado SATTR fue con temperatura de aire variando de entre 200 y 240°C y tiempo entre 5 y 50 segundos. La velocidad del aire fue mantenida a 3.95 m s<sup>-1</sup>. El modelo de Page fue el que más se ajustó a los datos de secado.

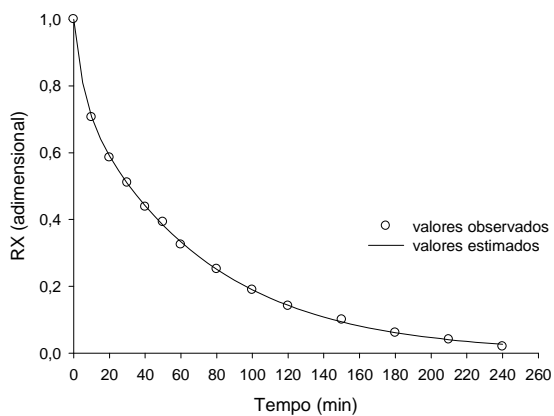
En la siguiente figura se muestran los datos experimentales y las curvas ajustadas por el modelo de Aproximación a la difusión para describir la cinética de secado de las hojas de hierba-limón secas a 50°C constante y sometida a secado con tratamiento previo (SATTR):



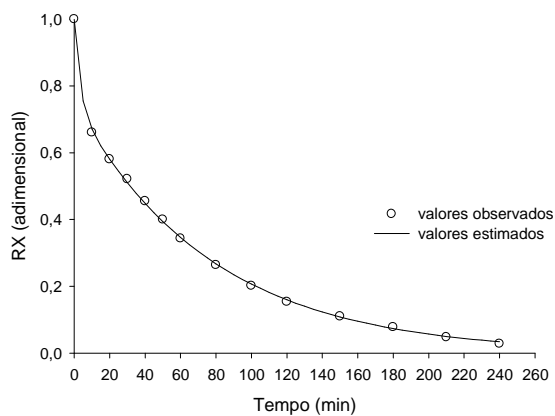
50°C



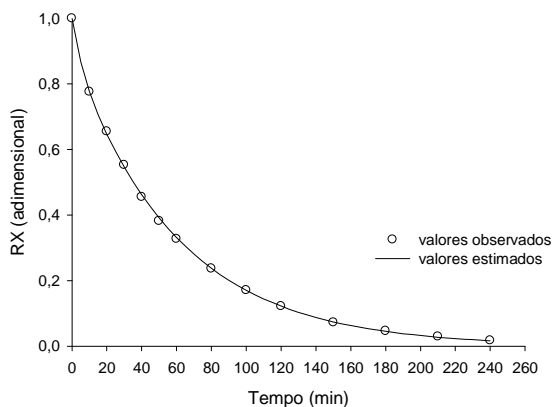
Pretratamiento a 60°C por 5 minutos



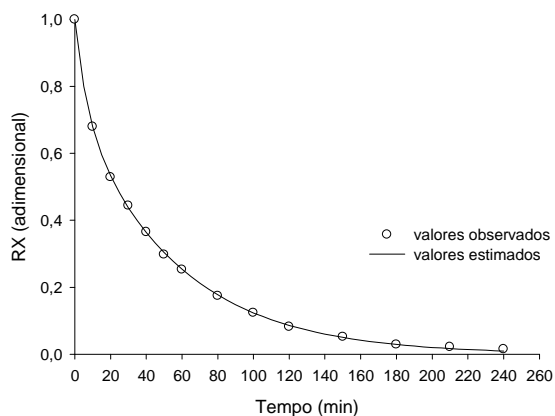
Pretratamiento a 60°C por 10 minutos



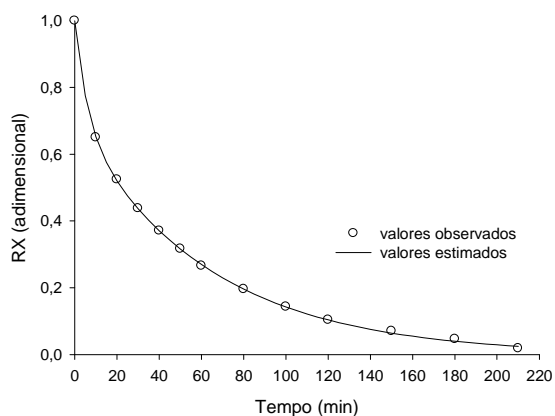
Pretratamiento a 60°C por 15 minutos



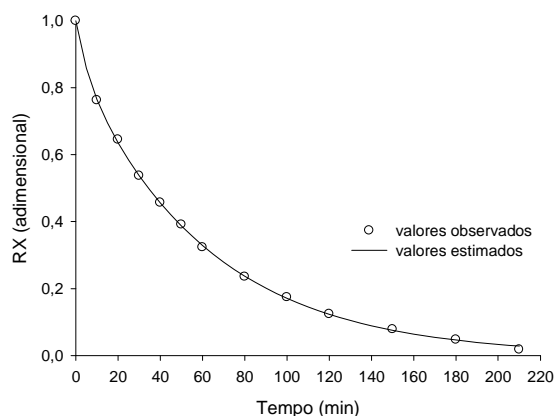
Pretratamiento a 70°C por 5 minutos



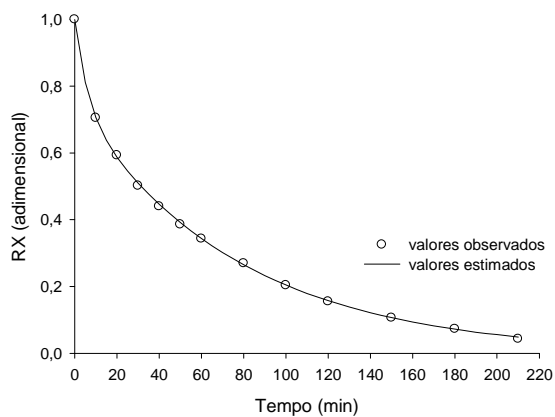
Pretratamiento a 70°C por 10 minutos



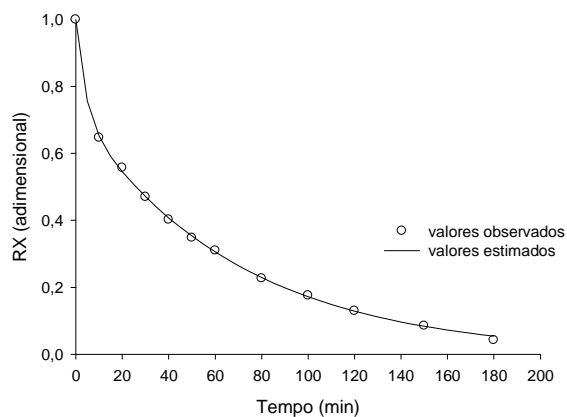
Pretratamiento a 70°C por 15 minutos



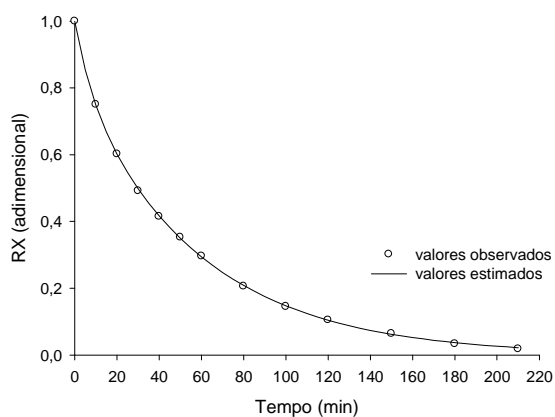
Pretratamiento a 80°C por 5 minutos



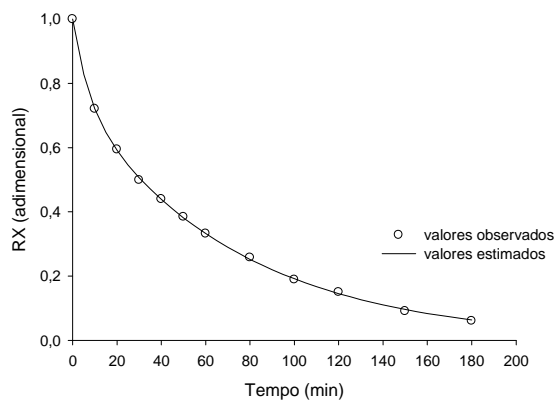
Pretratamiento a 80°C por 10 minutos



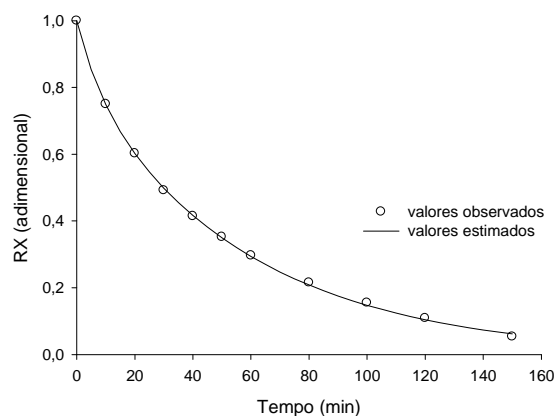
Pretratamiento a 80°C por 15 minutos



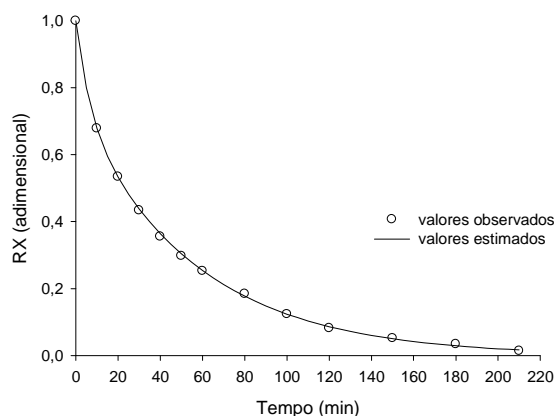
Pretratamiento a 90°C por 5 minutos



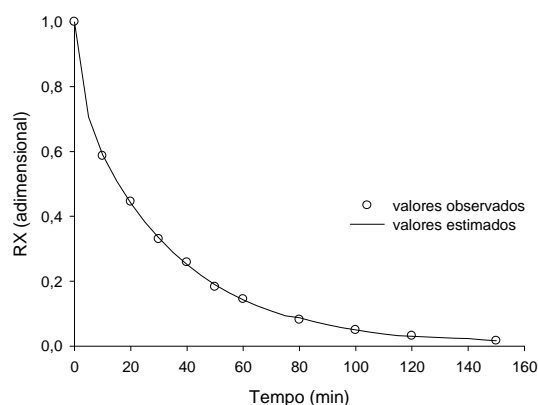
Pretratamiento a 90°C por 10 minutos



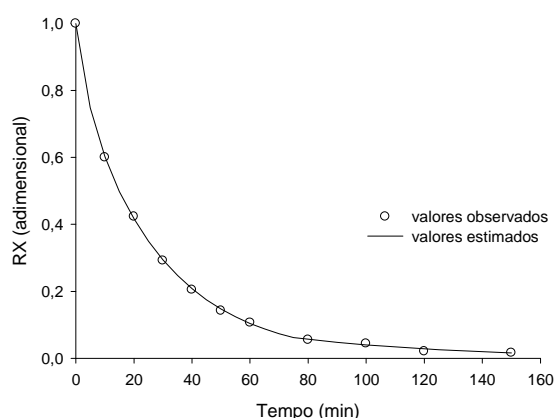
Pretratamiento a 90°C por 15 minutos



Pretratamiento a 100°C por 5 minutos



Pretratamiento a 100°C por 10 minutos



Pretratamiento a 100°C por 15 minutos

**Figura 4.** Curvas de secado de las hojas de hierba-limón secas a 50°C y sometidas a pretratamiento a alta temperatura en los tiempos de 5, 10 e 15 minutos (SATTR) ajustada por el modelo de aproximación a la difusión.

De acuerdo con los resultados de estos gráficos, se verifica que el mayor tiempo de secado fue cuando se utilizó temperaturas de 50°C constante, comparativamente con las muestras sometidas al pretratamiento de secado (SATTR), con excepción del pretratamiento de 60°C y 5 minutos. El tiempo de secado descende con el aumento de la temperatura alta inicial (60, 70, 80, 90 y 100°C) y con el aumento del tiempo de permanencia en esa temperatura (5,10, 15 minutos) esta reducción se debe a que el aumento de la temperatura del aire disminuye su humedad relativa y consecuentemente, aumenta su potencial de secado.



El tiempo de secado con pretratamiento de 60°C durante cinco minutos fue de 270 minutos, y para 10 y 15 minutos fueron 240 minutos. Con el aumento de la temperatura de 60 a 70°C, el tiempo de secado se redujo para 240 y 210 minutos (reducción de 11,11 y 12,5%) para los tiempos de 5 y 15 minutos, respectivamente. Para el tiempo de permanencia en alta temperatura de 10 minutos, no hubo reducción entre las temperaturas de 60 y 70°C, ambas con un tiempo de secado de 240 minutos. Cuando la temperatura fue aumentada de 60 para 80°C, este tiempo fue reducido para 210, 210 y 180 minutos (reducción de 22,23, 12,5 y 25 %) para los tiempos de 5,10 y 15 minutos, respectivamente. Al aumentar la temperatura de secado de 60 para 90°C, el tiempo fue reducido para 210, 180 y 150 minutos (reducción de 22,23, 25 y 37%) y cuando aumentó de 60 para 100°C, el tiempo fue reducido para 210, 150 y 150 minutos (reducción de 22,23, 37,5 y 37,5%) para los tiempos de 5, 10 y 15 minutos de permanencia en alta temperatura, respectivamente. El secado con tratamiento previo (SATTR) de las hojas de hierba-limón tiene como ventaja la optimización del proceso, disminuyendo el tiempo de secado y proporcionando un mejor aprovechamiento del secadero.

## CONCLUSIONES

Considerando las condiciones en que el trabajo fue realizado, y teniendo en cuenta los objetivos y los resultados obtenidos, se puede concluir que:

- el modelo matemático de Aproximación a la Difusión fue el que mejor se ajustó a los datos experimentales para describir la cinética de secado de las hojas de hierba-limón
- para el secado de las hojas de hierba-limón, los valores de los coeficientes de difusividad efectiva variaron entre  $2,01$  a  $4,91 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para los ensayos de secado que sufrieron secado tratamiento previo (SATTR) y fue de  $3,24 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  para el tratamiento de secado a  $50^\circ\text{C}$
- los valores de la energía de activación para la difusión de agua en el secado de hierba-limón fueron de  $10,87$ ,  $15,08$  y  $16,78 \text{ kJ mol}^{-1}$  para los tiempos de  $5$ ,  $10$  y  $15$  minutos, respectivamente

## REVISION BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, E.T.; BORÉM, F.M.; HARDOIM, P.R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.1, n.7, p.37-43, 2003.

ALMEIDA, T. de C.; CANECCHIO FILHO, V. **Principais culturas**. 2 ed. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973, 2 v. ilustr.

FERREIRA, S.H. (org.) **Medicamentos a partir de plantas medicinais no Brasil**, Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1998, 142 p. Disponível em: <<http://www.abc.org.br>>. Acesso em: 28 out. 2002.

CALIXTO, J.B. Efficacy, safety, quality control, market and regulatory guidelines for herbal medicines (phytotherapeutic agents). **Brazilian Journal of Medical and Biological Research**, v. 33, n. 2, p.179-189, 2000.

LEWINSOHN, E. DUDAI, N., TADMOR, Y., KATZIR, I., RAVID, U. PUTIEVKY, E.; JOEL, D. M. Histochemical localization of citral accumulation in lemongrass leaves (*Cymbopogon citratus* (D.C.) Staff. *Poaceae*). **Annals of Botany**, v. 81, p. 35 – 39, 1998.

SILVA Jr, A.A. **Essentia Herba** – Plantas Bioativas. Florianópolis: Epagri, 2003, 441 p.

SOUSA, M.P. de; MATOS, M.E.O.; MATOS, F.J. de A.; MACHADO, M.I.L.; CRAVEIRO, A.A. **Constituintes químicos ativos de plantas medicinais brasileiras**. Fortaleza: Edição UFC / Laboratorio de Productos Naturales, 1991, 416 p.

LORENZI, H.; MATOS, F.J. de A. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002.

CHRISTENSEN, C.M.; KAUFMANN, H.H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. **Storage of cereal grain and their products**. St. Paul: American Association of Cereal Chemists, 1974.

BROOKER, D.B.; BAKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book Pub., 1992, 450p.

DOYMAZ I.; Drying kinetics of white mulberry, **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 341 – 346, 2004.

KEEY, R.B. **Drying: principles and practice**. New York: Pergamon Press. 1972.

RIZVI, S.S.H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M.A. & RIZVI, S.S.H. (eds.). **Engineering Properties of Foods**. New York: Marcel Dekker Inc., 1986.

MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, p. 75 – 97, 1996.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349 – 357, 2002.

SRIVASTAVA J, Lambert J Vietmayer N, editors, 1996. Medicinal plants: an expanding role in development. World Bank Technical Paper. No: 320. Available from: [www.wds.Worldbank.org/servlet/WDSCContentServer/WDSP/IB1996/04/01/0000092653961219094248/Rendered\(PDF/multi\\_page.pdf](http://www.wds.Worldbank.org/servlet/WDSCContentServer/WDSP/IB1996/04/01/0000092653961219094248/Rendered(PDF/multi_page.pdf). Accessed 2004 November 22.

LEWINGTON A.1993. A Review of the importation of medicinal plants and plant extracts into Europe: TRAFFIC Internacional. Cambridge, UK: Traffic International. 37 pp.

NEGRELLE, R. R. B.; GOMES, E. C. *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf: chemical composition and biological activities. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.9, n.1, p.80-92, 2007.

AKYILDIZ, A., AKSAY, S., BENLI, H., KIROGLU, F. FENERCIOGLU, H. Determination of changes in some characteristics of persimmon during dehydration at different temperatures. **Journal of Food Engineering**. 65:95-99. 2004.

SOKHANSANJ, S.; YANG, W. Revision of the ASAE standard D245.4: moisture relationships of grains. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 39, n.2, 1996.

BERBERT, P. A., MELO, E. C., ALVARENGA, R. C., SOUZA, E. F. Contenido de humedad de equilibrio. In. VI Congreso Argentino de Ingeniería Rural – Cadir 2000, Buenos Aires, **Proceedings** in CD-ROM, Buenos Aires Editorial Facultad de Agronomía, 2000.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; VAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503-1513, 2002.

PANCHARIYA, P.C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A.L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 349 – 357, 2002.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*phaseolus vulgaris* l.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.501-507, 2007.

DOYMAZ, I. The Kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.243-248, 2007a.

MOHAPATRA, D. e P. S. RAO. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. 66(4): 513-518, 2005.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, London, v.61, n.2, p.173-9, 2004.

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of halzenuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.225-233, 1999.

MELO, E. C.; LOPES, D. C.; CORRÊA, P. C. GRAPSI – Programa Computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Engenharia na Agricultura**, v.12, p.154-162, 2004.

## ANEXO

**Tabla 01.** Coeficientes de determinación ( $R^2$ ), errores medios relativos (EMR) y errores medios estimados (EME) de los modelos ajustados a los datos experimentales de secado sometidos a pretratamiento (SATTR) por 5 minutos.

Modelo matemático	T (°C)	EMR (%)	EME	$R^2$ (%)	Modelo matemático	T (°C)	EMR (%)	EME	$R^2$ (%)
Midilli et al.	60	3,52	0,0073	99,98	Henderson & Pabis modificado	60	5,05	0,0119	99,94
	70	3,92	0,0110	99,94		70	7,55	0,0238	99,77
	80	3,25	0,0109	99,94		80	9,18	0,0278	99,68
	90	9,07	0,0111	99,94		90	10,66	0,0328	99,56
	100	4,30	0,0112	99,94		100	18,91	0,0497	98,85
Page	60	2,21	0,0057	99,98	Aproximação da difusão	60	2,03	0,0075	99,98
	70	4,26	0,0091	99,95		70	3,32	0,0108	99,95
	80	3,40	0,0103	99,95		80	2,81	0,0110	99,95
	90	11,16	0,0135	99,90		90	4,22	0,0072	99,98
	100	10,63	0,0157	99,86		100	4,03	0,0131	99,92
Lewis	60	6,09	0,0124	99,92	Thompson	60	30,55	0,0621	98,09
	70	9,98	0,0252	99,64		70	6,20	0,0135	99,91
	80	12,40	0,0299	99,48		80	9,40	0,0176	99,84
	90	11,28	0,0334	99,35		90	14,51	0,0189	99,81
	100	26,78	0,0538	98,20		100	17,51	0,0235	99,69
Exponencial de dois termos	60	2,98	0,0101	99,95	Wang & Sing	60	25,74	0,0537	98,57
	70	3,84	0,0104	99,95		70	24,70	0,0742	97,14
	80	2,96	0,0197	99,94		80	32,23	0,0764	96,89
	90	9,35	0,0113	99,93		90	35,18	0,0027	96,69
	100	12,71	0,0306	99,47		100	94,47	0,1247	90,79
Dois termos	60	5,04	0,0113	99,94	Page modificado	60	2,20	0,0057	99,98
	70	7,60	0,0224	99,77		70	4,28	0,0100	99,95
	80	9,21	0,0262	99,68		80	3,42	0,0103	99,95
	90	10,66	0,0306	99,56		90	11,17	0,0135	99,90
	100	18,93	0,0471	98,85		100	10,56	0,0157	99,87
Henderson & Pabis	60	4,99	0,0107	99,94	Logarítmico	60	34,65	0,0807	97,35
	70	7,58	0,0213	99,77		70	7,15	0,0175	99,86
	80	9,19	0,0249	99,68		80	6,95	0,0198	99,81
	90	10,65	0,0289	99,56		90	15,43	0,0271	99,66
	100	18,93	0,0449	98,85		100	21,07	0,0398	99,19



**Tabla 02.** Coeficientes de determinación ( $R^2$ ), errores medios relativos (EMR) y errores medios estimados (EME) de los modelos ajustados a los datos experimentales de secado sometidos a pretratamiento (SATTR) por 10 minutos.

Modelo matemático	T (°C)	EMR (%)	EME	$R^2$ (%)	Modelo matemático	T (°C)	EMR (%)	EME	$R^2$ (%)
Midilli et al.	60	9,22	0,0180	99,83	Henderson & Pabis modificado	60	12,38	0,0553	98,55
	70	3,00	0,0063	99,98		70	14,68	0,0478	99,02
	80	5,00	0,0127	99,92		80	12,66	0,0553	98,50
	90	2,25	0,0055	99,99		90	12,28	0,0481	98,91
	100	1,72	0,0087	99,96		100	9,51	0,0429	99,04
Page	60	13,54	0,0246	99,63	Aproximação da difusão	60	4,88	0,0123	99,93
	70	5,44	0,0100	99,95		70	1,59	0,0046	99,99
	80	7,62	0,0191	99,78		80	3,15	0,0111	99,93
	90	5,60	0,0125	99,91		90	1,78	0,0043	99,99
	100	3,03	0,0099	99,94		100	1,31	0,0074	99,97
Lewis	60	13,62	0,0591	97,62	Thompson	60	31,47	0,0589	97,87
	70	19,80	0,0485	98,56		70	9,47	0,0175	99,83
	80	19,84	0,0617	97,41		80	11,12	0,0264	99,57
	90	18,84	0,0532	98,16		90	9,65	0,0208	99,75
	100	15,20	0,0510	98,19		100	5,10	0,0160	99,84
Exponencial de dois termos	60	11,64	0,0350	99,26	Wang & Sing	60	33,51	0,0936	94,54
	70	7,92	0,0229	99,71		70	47,38	0,0995	94,42
	80	9,34	0,0361	99,20		80	32,61	0,1013	93,54
	90	6,70	0,0264	99,58		90	34,02	0,1028	93,61
	100	5,83	0,0222	99,69		100	19,71	0,0766	96,22
Dois termos	60	12,37	0,0517	98,55	Page modificado	60	13,54	0,0074	99,63
	70	14,68	0,0447	99,02		70	5,45	0,0100	99,95
	80	12,66	0,0521	98,50		80	7,62	0,0191	99,78
	90	12,27	0,0454	98,91		90	5,98	0,0125	99,91
	100	9,54	0,0408	99,04		100	3,03	0,0099	99,94
Henderson & Pabis	60	12,38	0,0488	98,55	Logarítmico	60	18,18	0,0460	98,85
	70	14,68	0,0421	99,02		70	12,32	0,0344	99,42
	80	12,66	0,0495	98,50		80	11,46	0,0437	98,95
	90	12,25	0,0430	98,91		90	11,81	0,0364	99,30
	100	9,56	0,0388	99,04		100	6,72	0,0286	99,53

**Tabla 03.** Coeficientes de determinación ( $R^2$ ), errores medios relativos (EMR) y errores medios estimados (EME) de los modelos ajustados a los datos experimentales de secado sometidos a pretratamiento (SATTR) por 15 minutos.

Modelo matemático	T (°C)	EMR (%)	EME	$R^2$ (%)	Modelo matemático	T (°C)	EMR (%)	EME	$R^2$ (%)
Midilli et al.	60	5,44	0,0187	99,82	Henderson & Pabis modificada	60	12,08	0,0609	98,10
	70	3,64	0,0071	99,97		70	20,58	0,0585	98,42
	80	5,19	0,0093	99,95		80	15,77	0,0625	98,08
	90	3,49	0,0306	97,54		90	12,88	0,1087	92,68
	100	13,18	0,0202	99,74		100	17,83	0,0939	94,88
Page	60	7,65	0,0252	99,60	Aproximação da difusão	60	1,80	0,0067	99,97
	70	5,53	0,0360	99,92		70	3,02	0,0091	99,96
	80	9,87	0,0194	99,77		80	2,82	0,0192	99,93
	90	2,33	0,0557	97,65		90	1,40	0,0109	99,93
	100	22,42	0,0358	99,09		100	2,95	0,0075	99,97
Lewis	60	20,73	0,0696	96,56	Thompson	60	11,23	0,0329	99,31
	70	27,53	0,0606	97,62		70	10,05	0,0187	99,80
	80	24,56	0,0681	96,85		80	14,57	0,1207	99,57
	90	15,50	0,0960	92,12		90	2,22	0,0559	97,64
	100	30,38	0,1047	91,07		100	24,33	0,0369	99,03
Exponencial de dois termos	60	11,09	0,0459	98,66	Wang & Sing	60	30,36	0,0105	92,76
	70	15,72	0,0366	99,22		70	52,86	0,1239	90,60
	80	12,99	0,0441	98,81		80	44,14	0,1210	90,88
	90	10,15	0,0769	95,48		90	11,77	0,0868	94,22
	100	19,24	0,0816	95,17		100	48,11	0,1577	80,51
Dois termos	60	12,07	0,0575	98,10	Page modificado	60	7,66	0,0252	99,60
	70	20,56	0,0547	98,42		70	5,54	0,0114	99,92
	80	15,78	0,0590	98,08		80	9,84	0,0194	99,77
	90	12,90	0,1025	92,68		90	25,12	0,1569	97,05
	100	17,83	0,0886	94,88		100	22,42	0,0358	99,09
Henderson & Pabis	60	12,08	0,0393	98,10	Logarítmico	60	14,37	0,0511	98,50
	70	20,55	0,0519	98,42		70	15,33	0,0418	99,42
	80	15,76	0,0559	98,08		80	17,86	0,0487	98,69
	90	12,91	0,0972	92,68		90	7,11	0,0580	97,71
	100	17,85	0,0840	94,88		100	33,08	0,0775	96,10

**Tabla 04.** Coeficientes de determinación ( $R^2$ ), errores medios relativos (EMR) y errores medios estimados (EME) de los modelos ajustados a los datos experimentales de secado sometidos a 50°C constante

<b>Modelo matemático</b>	<b>T (°C)</b>	<b>EMR(%)</b>	<b>EME</b>	<b><math>R^2</math>(%)</b>
Midilli et al.	50	4,59	0,0112	99,95
Page	50	6,42	0,0137	99,90
Lewis	50	9,58	0,0326	99,37
Exponencial de dois termos	50	4,67	0,0111	99,93
Dois termos	50	5,61	0,0275	99,63
Henderson & Pabis	50	5,59	0,0261	99,63
Henderson & Pabis modificada	50	5,63	0,0292	99,63
Aproximação da difusão	50	3,43	0,0097	99,95
Thompson	50	11,53	0,0229	99,32
Wang & Sing	50	36,52	0,0803	96,45
Page modificado	50	6,43	0,0137	99,90
Logarítmico	50	7,49	0,0243	99,71

